



РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗКАМИ

В статье анализируются проблемы внедрения систем автоматической оценки массы автомобилей, нагрузки по осям и степени загрузки кузова. На основе этих данных и имеющихся значений по себестоимости перевозок, а также расчетных величин оценки потенциального вреда для дорожного покрытия решается многокритериальная оптимизационная задача по выбору оптимальной модели транспорта и параметров перевозки. В качестве математического метода применен модифицированный метод поиска Парето-оптимальных решений. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров перевозочного процесса на коэффициент использования грузоподъемности. Полученная математическая оптимизационная модель адаптирована для использования в автоматизированных системах управления грузовыми перевозками.

Погрузка грузовых автомобилей, емкость кузова, автоматическая система контроля, грузовые перевозки.

Грузовые перевозки автомобильным транспортом являются одним из наиболее весомых вкладов в общий объем выбросов парниковых газов в атмосферу. Однако на данный момент есть положительные сдвиги в этом вопросе в связи с ростом доли электрифицированного транспорта. Но куда меньшее внимание уделяется социальным и экономическим последствиям эксплуатации грузового транспорта, связанным с неизбежным влиянием на покрытие дорог. При этом несмотря на действующие законодательные ограничения в этой сфере тема продолжает оставаться актуальной. Проблема перегруза грузовых автомобилей и превышения нормативных величин загрузки осей является актуальной для России с ее сравнительно медленным обновлением парка грузовых автомобилей и все возрастающей долей перевозок грузов автомобильным транспортом по достаточно ограниченной сети федеральных транзитных трасс, особенно ввиду расширения транспортных коридоров ЕС – Китай; в последнем согласно официальным сообщениям около 70–80 % аварий так или иначе связаны с перегруженными или негабаритными грузовиками, в России это порядка 48 %). В исследовании [1] рассчитан эффект от повреждения дорожного покрытия от перегруженных автомобилей, дополнительные затраты на восстановление дороги составляют до 100 % от суммы первоначальных затрат. С точки зрения перевозчика это при небольшом первоначальном выигрыше от объема перевозки дает значительный отрицательный эффект в виде резкого возрастания числа и тяжести поломок ходовой части, подвески, рамы и снижения ресурса шин. Влияние загрузки грузового автомобиля, центра расположения масс и степени загрузки, так же как и распределение ее по осям, на тормозные качества исследовано в [2] для коммерческих автомобилей. Исходя из полученных

экспериментальных и аналитических данных, имеется возможность оценить влияние указанных величин на изменение параметров процесса торможения: величину замедления и устойчивость при торможении. С точки зрения системного подхода и реализации управленческих воздействий в области сокращения числа случаев движения с перегрузом на автомагистралях существует система решений [3].

Особенный интерес эта задача приобретает при осуществлении массовых грузовых перевозок сыпучих строительных грузов или при разработке полезных ископаемых [4]. В данном случае степень загрузки транспорта является одним из важных критериев оптимизации всего производственного процесса наряду с себестоимостью перевозок, регулирование производительности техники и оптимизацией погрузочно-разгрузочных работ. Однако в целом в данных условиях задача существенно упрощается в виду однородности перевозимых грузов по плотности и стабильности маршрутов движения.

Исследовано влияние степени загрузки грузовых автомобилей на изменение количества выбросов токсичных компонентов отработавших газов при одинаковых условиях движения. Причем наибольшее увеличение выбросов CO₂, CO, HC и NO_x на 96,2, 47,9, 27,8 и 65,2 % соответственно получено в режиме небольших скоростей – 0–30 км/ч, что характерно для городской эксплуатации.

Сама по себе задача регулирования коэффициента использования грузоподъемности с точки зрения регулирования степени загрузки кузова автомобиля в зависимости от плотности перевозимого груза и необходимого учета ограничений по загрузке осей решается достаточно легко на основе известных численных уравнений.

Maximum load (regulatory limit) = 24 tons Maximum volume = 23 m³ with slide (20.5 m³ on the sides)

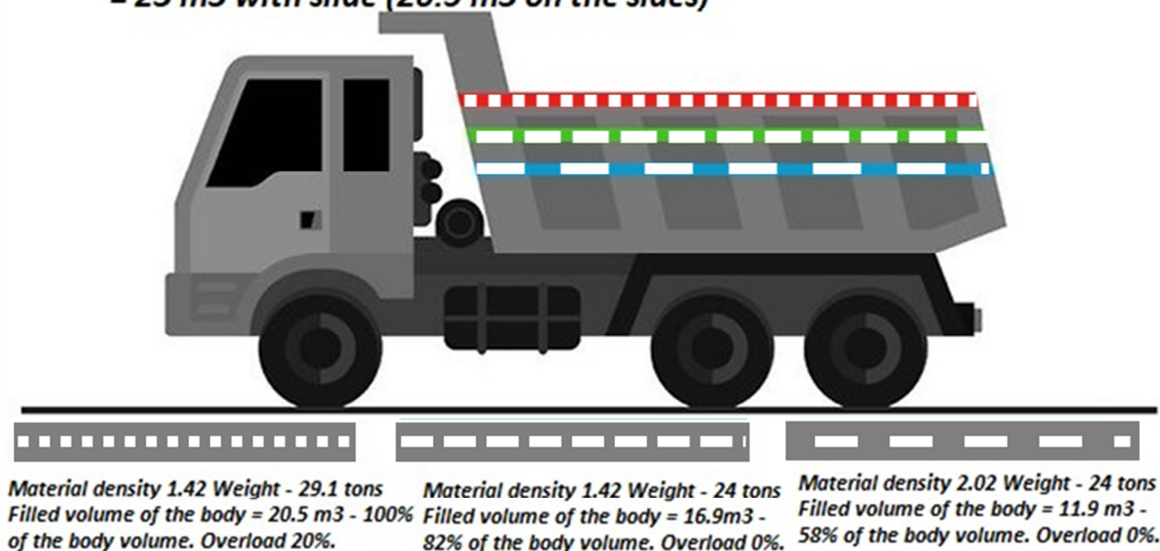


Рис. 1. Пример изменения степени загрузки грузового автомобиля в зависимости от плотности груза (материалы журнала *Special Trucks*)

Однако в условиях работы реального предприятия это представляется практически неразрешимой задачей в виду объема и большого числа одновременно работающих единиц техники. Например, опыт эксплуатации автомобильного предприятия ПАО «Северсталь» (Череповец, Россия) говорит о том, что одновременно в период с 7:00 до 8:00 утра каждого дня в работу по перевозке различных грузов отправляется порядка 180–210 грузовых автомобилей.

С точки зрения поиска решения оптимизации нагрузки на оси грузовика предлагается несколько подходов. Ограничение веса оси, при этом изучаются потенциальные возможности выполнения правил California Vehicle Code, формирования трех моделей грузовых автомобилей с полуприцепами с тремя ограничениями для каждой: одно ограничение для группы передних осей, одно для группы задних осей и одно для полной массы транспортного средства. После чего используется Greedy Randomized Adaptive Search Procedure Wall-Building Algorithm для нахождения оптимальной схемы размещения коробок с грузом и проверяется выполнение ограничения веса оси. Для этого рассчитывается идеальный центр масс контейнера. Затем отклонение между идеальным центром масс и текущим центром масс контейнера сводится к минимуму за счет перемещения груза в пределах кузова. Предложенный вариант используется при решении 3D-задачи расположения груза. Ограничение веса оси учитывается для грузовых автомобилей с двумя осями и включается в математическую модель путем расчета равновесия для действующих моментов и сил. В данной работе эта модель расширена дополнительными ограничениями, такими как ограничения динамической стабильности. Подходы 2D-задач оптимизации расположения груза позволяют упростить численное моделирование, но они несколько упрощены с точки зрения применения их для перевозки именно строительных и прочих сыпучих грузов, так как именно в этих случаях

велико значение относительной неравномерности расположения груза в кузове автомобиля относительно его продольной оси.

Очевидно, что единственно возможным решением здесь является использование автоматизированных систем управления транспортными средствами и перевозочным процессом. Они работают с использованием установленной на транспортных средствах системы удаленного контроля транспорта, а также средств дистанционной диагностики автомобилей и онлайн-системы планирования и распределения перевозок грузов между потребителями.

Настоящее исследование в этом ключе является продолжением и попыткой свести известные методы определения частных факторов перевозочного процесса: себестоимость перевозок, производительность работы грузового транспорта и оценка потенциального вреда для дорожного покрытия на основе данных о загрузке осей транспортного средства. Последнее является частной задачей, для решения которой предложены приведенные в экспериментальной части комбинированные методы, объединяющие использование дорожных весов для определения нагрузки на ось и возможностей машинного зрения с использованием предварительно обученной нейросети для определения параметров перевозимого сыпучего груза (расположение его выше бортов, неравномерность при погрузке или неполное использование вместимости кузова).

Экспериментальные исследования были проведены на предприятиях г. Санкт-Петербурга и г. Вологды в течение 2020–2022 гг. Предприятия занимаются перевозкой строительных насыпных грузов: песок, щебень, торф, плодородный грунт. Парк автомобилей – грузовые автомобили – самосвалы грузоподъемностью от 14 до 28 т. Для получения данных по степени загрузки кузова использовались решения Loadscan@ Load Volume Scanner (LVS) для лазерного сканирования кузова (рис. 2).

Данные передавались в имеющуюся на предприятии систему телематического контроля транспорта (Omnicom, Автограф) с привязкой к дате поездки, длине поездки, номеру автомобиля при прохождении контрольно-пропускного пункта предприятия. Для измерения нагрузки транспортного средства на оси использовалась система с дорожными весами с удаленной передачей данных в телематическую систему, при этом номер автомобиля определялся автоматически по данным камеры наблюдения. Пример комплектации системы с привязкой к инженерным сооружениям предприятия и вариантом передачи данных в головной сервер представлен на рисунке 3.

Кроме того, были проведены опытные испытания системы машинного зрения с последовательно обученной на экспериментальной выборке нейросетью для определения возможностей удаленного мониторинга степени загрузки кузова грузовых автомобилей – самосвалов и контролем количества осей и длины транспортных средств. Примеры работы подобных систем по считыванию параметров грузовых транспортных средств: длина и число осей приведены на рисунках 4, а степени загрузки кузова – на рисунке 5.



Рис. 2. Схема варианта комплектации измерительного оборудования Load Volume Scanner (LVS)

The point of weight control before the checkpoint of departure from the territory of the enterprise

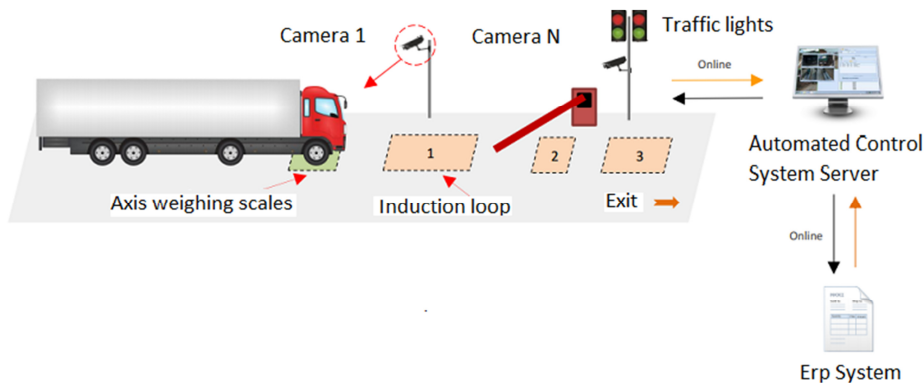


Рис. 3. Схема расположения электронных дорожных весов в системе Load Volume Scanner (LVS)

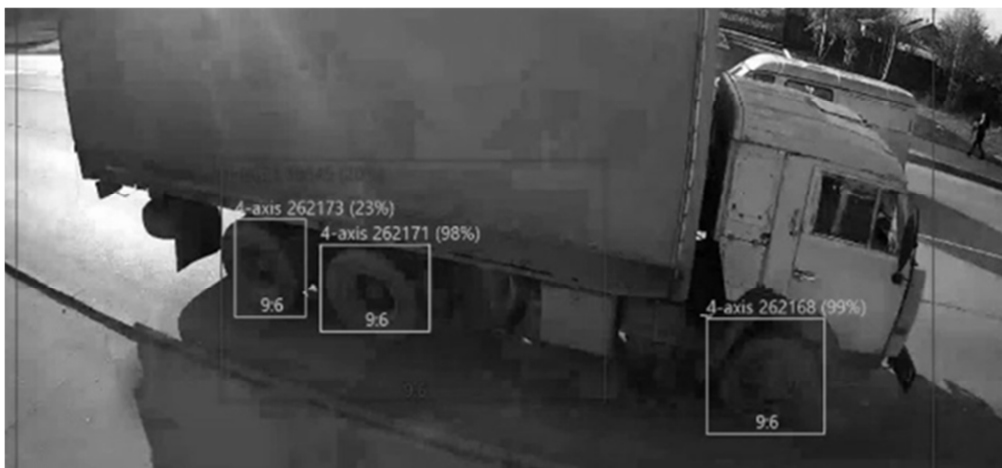


Рис. 4. Пример работы машинного зрения при определении числа осей автомобиля



Рис. 5. Пример работы машинного зрения при определении степени и параметров загрузки открытого самосвального кузова

Данные по удельной себестоимости транспортной работы грузовых автомобилей были получены из отчетных данных предприятий за исследуемый период, величины потенциального вреда дорожному покрытию определены исходя из фактически определенной по электронным дорожным весам загрузки автомобилей с помощью математической модели.

Величину полезного эффекта от эксплуатации с точки зрения перевозки навалочных грузов можно определить, зная производительность работы грузовых автомобилей:

$$W_{p-d} = (T_n \cdot \beta \cdot V_T \cdot l_{ef} \cdot q \cdot \gamma_d) / (l_{ef} + t_{n-p} \cdot \beta \cdot V_m), \quad (1)$$

где T_n – время в наряде, ч;

β – коэффициент использования пробега;

V_T – среднетехническая скорость, км/ч;

l_{ef} – длина груженой ездки, км;

t_{n-p} – время простоя под погрузкой и разгрузкой, ч.

На основании полученных экспериментальных данных по перевозкам на маршрутах г. Вологды (строительные сыпучие грузы: песок, щебень) была получена выборка данных для автомобилей КАМАЗ – 65201 по нагрузке на оси, объему перевезенного груза, удельным затратам на перевозку. С точки зрения разработки алгоритма автоматизированного решения данной задачи необходимо установление оптимальной степени загрузки грузового автомобиля для наиболее эффективного выполнения перевозочного процесса.

Для решения указанной задачи возможно применение метода линейного программирования с учетом трех критериев эффективности (2) и ограничений (3).

$$\begin{aligned} K_1 &= a_{11}x_1 + a_{21}x_2 + a_{31}x_3 \rightarrow \max, \\ K_2 &= a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + a_{32}x_3 \rightarrow \min, \\ K_3 &= a_{13}x_1 + a_{23}x_2 + a_{33}x_3 \rightarrow \min, \\ x_1 + x_2 + x_3 &= N, \end{aligned} \quad (2)$$

$$x_i = \begin{cases} N, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

Данные по нагрузке на оси грузового автомобиля были получены при этом двумя способами. Первый – это непосредственное измерение с помощью дорожных весов при выезде автомобиля с места погрузки, второй – приблизительная оценка исходя из степени загрузки известного по объему кузова (20,5 м³ по борту), плотности перевозимого груза (сухой песок, влажный песок, щебень различных фракций) и характеристики его загрузки в кузове (без горки, с горкой, смещение к заднему борту, смещение к кабине) и автоматического определения числа осей. Предварительно было проведено исследование влияния расположения сыпучего груза в кузове на распределение нагрузки по осям для исследуемых автомобилей КАМАЗ. Результаты обработки 34 измерений нагрузки на оси при различных способах размещения сыпучего груза приведены в таблице 1.

Таблица 1

Относительное изменение загрузки осей трехосного автомобиля при различном размещении сыпучего груза относительно базового варианта (равномерно по бортам кузова)

Размещение груза в кузове	Относительное изменение загрузки, %		
	Передняя ось	Средняя ось	Задняя ось
С горкой выше бортов	+15	+24	+23
С горкой ниже бортов	+12	+17	+14
Горка у заднего борта	+3	+18	+23
Горка у кабины	+21	+19	+13

По итогам калибровки системы машинного зрения был проведен сравнительный анализ возможностей системы Loadscan® Load Volume Scanner (LVS) для лазерного сканирования кузова и разработанной системы машинного зрения с результатами взвешивания осей автомобилей на электронных дорожных весах на имеющейся выборке в 14 автомобилей КАМАЗ – 65201. При этом измерения с весов были приняты за эталон. Результаты сравнения относительной величины погрешности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение точности определения загрузки кузова грузового автомобиля

Система	Погрешность оценки веса оси, %		
	Передняя ось	Средняя ось	Задняя ось
LVS	4.1	5.6	7.3
Система машинного зрения с обученной нейросетью	8	11.4	12.3

Первоначальная задача определения нагрузки на оси грузовых автомобилей хорошо решается приме-

нением точных электронных дорожных весов, однако это существенное финансовое вложение и возможности предприятия по количеству мест установки, тем более для временных карьеров, существенно ограничены. Предлагаемая компанией Loadscan® система Load Volume Scanner (LVS) для лазерного сканирования кузова, как показали экспериментальные исследования на базе существующих данных, достаточно точно справляется с задачей удаленного дистанционного контроля и оценки степени загрузки кузова, что вместе с известными данными по плотности груза, объему кузова и теоретической информацией о степени распределения загрузки по осям дает достоверный результат с минимальной погрешностью до 7,3 %. Этот вариант с точки зрения предприятий более прост для применения, так как не требует сложной инфраструктуры и больших финансовых затрат. При этом возможно оборудование и временных карьеров или стройплощадок.

Разработанное в виде экспериментального образца решение, объединяющее систему машинного зрения и обученную на контрольной выборке нейросеть для оценки степени и характера загрузки открытых кузовов грузовых автомобилей, дает большую погрешность измерений до 12,3 %. При этом это самый недорогой по финансовым затратам вариант, объединяющий возможности второго варианта с точки зрения необходимой инфраструктуры и технологии передачи данных.

При получении итоговых данных по нагрузке на оси исследуемых автомобилей (использовались наиболее точные данные при наличии данных от электронных весов) предложенная математическая оптимизационная модель (2) была решена для случая системы уравнений изменения удельных показателей в зависимости от изменения значения коэффициента изменения грузоподъемности на основе полученных данных о фактической загрузке кузова грузовика:

$$\begin{aligned} p_{неpf}(\gamma_c) &\rightarrow \max \\ s_{неpf}(\gamma_c) &\rightarrow \min, \\ u_{неpf}(\gamma_c) &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (4)$$

где $p_{неpf}(\gamma_c)$ – функция прибыли от перевозок автомобилями, $s_{неpf}(\gamma_c)$ – функция удельных затрат на км пробега автомобилей, $u_{неpf}(\gamma_c)$ – функция реализуемого ущерба дорожному покрытию при выполнении перевозочного процесса. На основе проведенного экспериментального исследования получены данные по величинам, входящим в указанные уравнения, и итоговая система представляется следующим образом:

$$\begin{cases} y = 448,5x^2 - 737,1x + 327,6 \\ y = 50x^2 - 125x + 116 \\ y = 87,5x^2 - 82,5x + 66 \end{cases} \quad (5)$$

Решая полученную систему графоаналитически (рис. 6) получим результирующую функцию $r(\gamma_c)$ (6).

Решение данной функции и представляет из себя нахождение оптимального варианта коэффициента использования грузоподъемности для конкретного маршрута перевозок:

$$r(\gamma_c) = 411\gamma_c^2 - 779,6\gamma_c + 377,6. \quad (6)$$

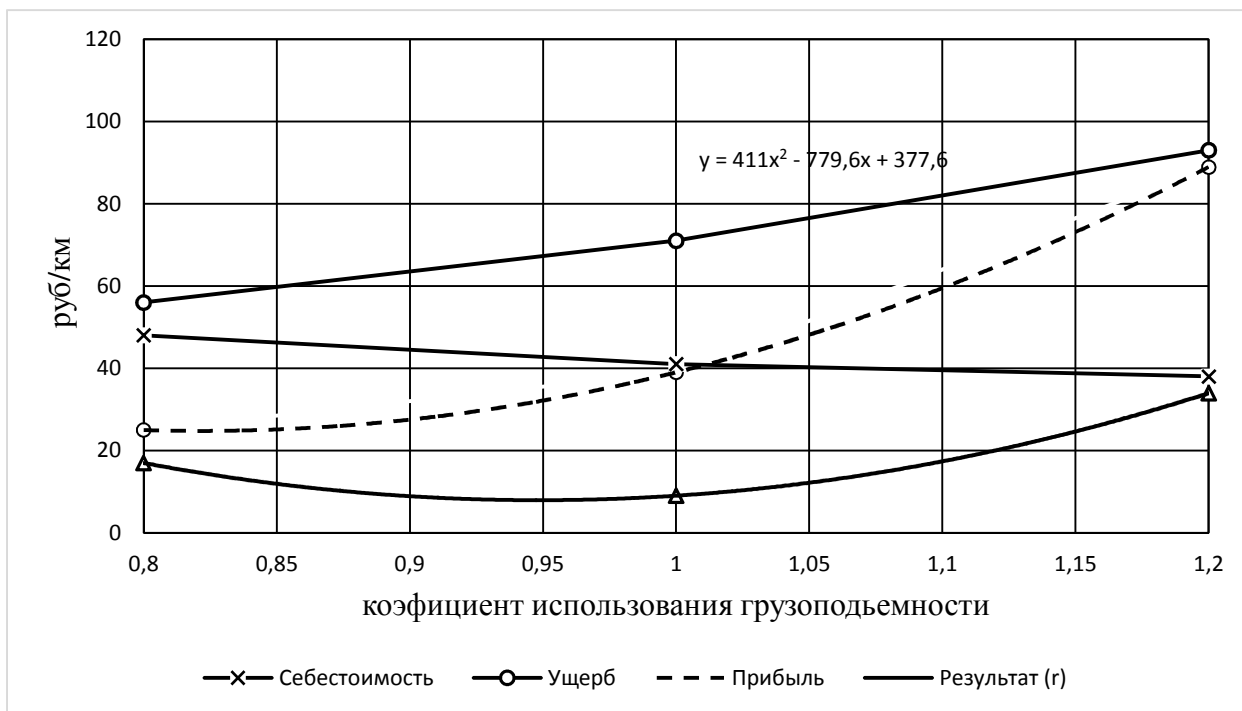


Рис. 6. Решение многокритериальной системы оптимизации

На основе экспериментальных данных это величина, равная 0,93, что в случае перевозок сыпучих грузов много выше значений, полученных в случае перевозки древесной стружки и опилок.

Вопрос оценки определения степени загрузки кузовов грузовых автомобилей и загрузки их отдельных осей имеет большое значение для сохранения дорожного полотна и минимизации ущерба окружающей среде с точки зрения серьезного повышения выбросов токсичных компонентов отработавших газов при перегрузке. Это требует безотлагательного решения, однако предприятия, занимающиеся грузовыми перевозками, не имеют недорогих и точных решений для эффективного контроля этих параметров при ежедневной работе. Это вынуждает их полагаться на опыт и мастерство операторов экскаваторов при загрузке сыпучих материалов в самосвалы, при этом повышается вероятность получения штрафных санкций от государственных органов при возможной перегрузке осей. Превентивное уменьшение массы перевозимого груза ведет к значительному снижению производительности и эффективности выполняемых перевозок.

Разработка автоматизированных систем для управления процессами перевозок может базироваться на получаемых математических моделях и модернизированных методах решения многокритериальных задач оптимизации параметров перевозочного процесса. Однако предложенное недорогое решение для дистанционного определения степени загрузки кузова применимо только для перевозок сыпучих грузов в открытых кузовах и при возможности допущения полученной погрешности измерений порядка 12,3 %. Что касается использования этого подхода к иным транспортным средствам (другое число осей, компо-

новка, форма кузова) или иным видам грузов, то это требует дальнейших исследований.

На основе проведенных экспериментальных исследований были получены данные по сравнению методов для оценки нагрузки на оси грузовых автомобилей с точки зрения применения решений для удаленной дистанционной оценки. Определены границы погрешности такой оценки и существующие ограничения применения метода.

При этом при наличии данных по степени загрузки кузова и данных о перевозимом грузе исходная задача оптимизации параметров перевозочного процесса решается применением разработанного адаптированного для транспорта решения задач линейного программирования с установлением оптимального значения коэффициента использования грузоподъемности.

Представленный алгоритм и математическая модель наряду с применением технологий машинного зрения может быть использована для создания системы автоматизированного контроля и управления процессами перевозки сыпучих грузов [5–6]. Алгоритм оценки степени загрузки кузова также может быть использован для контроля работы операторов погрузочных пунктов или обучения машинистов экскаваторов.

Литература

1. Pais, J.C., Impact of traffic overload on road pavement performance / J.C. Pais, S.I.R Amorim, M.J.C. Minhoto // Journal of Transportation Engineering, 2013. – vol. 139. – No. 9. – pp. 873–879.
2. Skrucany, T., Vrabel, J. & Kazimir, P. / T. Skrucany, J.Vrabel, P. Kazimir // The influence of the cargo weight and its position on the braking characteristics of

light commercial vehicles: *Open Engineering*, 2020. – vol. – 10, – No. 1. – pp. 154-165.

3. Bosso, M. Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data / M. Bosso, K.L. Vasconcelos, L.L. Ho, et al // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020. – vol. 7, – No. 6. – pp. 843-859.

4. Patyk, M., Bodziony, P. & Krysa, Z. 2021, A multiple criteria decision making method to weight the sustainability criteria of system selection for surface mining, *Energies*, – vol. 14, – No. 11.

5. Эффективность эксплуатации автомобиля. Методика анализа коэффициента технического использо-

вания в целях определения эффективного пробега эксплуатации: учебное пособие / А. И. Беляев, А. В. Терентьев, С. А. Евтюков, А. Е. Пушкарёв, И. В. Арифиллин. – Санкт-Петербург: ООО Издательский дом «Петрополис», 2019. – 30 с. – ISBN 978-5-9676-1147-6.

6. Определение технической и эксплуатационной производительностей дорожных машин на основе анализа объёмов работ / С. М. Грушецкий, С. А. Евтюков, С. В. Репин, А. А. Кузнецов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2021. – № 1. – С. 38-52.

P.I. Smirnov

Vologda State University

SOLVING THE PROBLEM OF OPTIMIZING DEGREE OF TRUCKS LOADING FOR AUTOMATED TRANSPORTATION MANAGEMENT SYSTEMS

The damage caused to the road surface only increases with the growth of the carrying capacity of trucks, the intensification of transportation processes and the increase in the share of intermodal transportation. Organizations engaged in freight transportation are forced to look for accurate and effective tools for everyday tasks of optimizing the transportation process and choosing a vehicle for the most efficient work while complying with legal and other restrictions. The best practice is the use of automated decision support systems for road transport management based on big-data aggregation from telematic control and transport management systems. The author analyzes the problems of introducing systems for automatic assessment of the mass of vehicles, axle loads and the degree of loading of the body. On the basis of these data and the available values for the cost of transportation, as well as the calculated values of assessing the potential damage to the road surface, a multicriteria optimization problem is solved to select the optimal transport model and transportation parameters. As a mathematical method, a modified method of searching for Pareto-optimal solutions is applied. The results of experimental studies of the influence of the parameters of the transportation process on the utilization factor of the carrying capacity are presented. The resulting mathematical optimization model is adapted for use in automated freight traffic control systems.

Truck loading, body capacity, automated control system, cargo transportation.